

# 无人飞行器延时航迹规划方法

雷刚<sup>1,2</sup>, 张大巧<sup>2</sup>, 王澈<sup>3</sup>

(1.西北工业大学航天学院,陕西西安,710072;第二炮兵工程大学,陕西西安,710025;

3.空军工程大学,陕西西安,710051)

**摘要** 编队飞行中无人飞行器由于战场态势改变等原因常常需要延迟打击目标。在定高飞行模式下,提出了基于分层规划的延时航迹规划方法,首先基于最小风险值选择最佳延时机动区域,然后采用基于解析法的延时航迹规划算法,生成满足延迟时间和飞行约束条件要求的延时机动航迹。通过分析计算各个航迹段附近区域的风险值,确定了无人飞行器延时机动的安全飞行区域;基于解析法提出徘徊延时航迹的规划算法,并用该算法生成满足飞抵时间延迟量要求的延时航迹。仿真结果显示,徘徊延时航迹规划算法能够高效准确地规划出需要的延时航迹,规划总时间在规定的时间内,较好地满足了无人飞行器需要延时飞行的时间要求。

**关键词** 航迹规划;解析方法;延时航迹;分层规划

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.005

**中图分类号** V249.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0020-04

## A Planning Method of Delay Path for Unmanned Aerial Vehicle

LEI Gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Da-qiao<sup>2</sup>, WANG Che<sup>3</sup>

(1.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

3. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** For the change of battlefield situation and other reasons, the unmanned aircraft Vehicles (UAV) in formation flight need flight delay in target attack. In the equal-altitude flying mode, the delay path planning method is presented based on hierarchical planning. First, this paper selects the best delay movement area based on the minimum risk value, and then adopts the delay path planning method to form the delay maneuver path satisfying the delay time and the requirement of flight constraints. Through analyzing and calculating risk of each track segment near the value, the UAV maneuver flight delay safe zone is determined and by using an analytical method the planning algorithm hover delay path is proposed based on the delay, delay time and the flight track constraints requirements. This algorithm is utilized to generate the time delay path satisfying the requirement of arrival time delay. The simulation results show that the hover delay path planning algorithm can accurately track the delay needed planning, plan a total time within the stipulated time, and meet the flight time delay requirement of UAV.

**收稿日期:** 2013-04-19

**基金项目:** 航空科学基金资助项目(20130196004)

**作者简介:** 雷刚(1978—),男,陕西蓝田人,副教授,主要从事导航、制导与控制研究.E-mail:leig603@163.com

**引用格式:** 雷刚,张大巧,王澈.无人飞行器延时航迹规划方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):20-23. LEI Gang, ZHANG Daqiao, WANG Che. A planning method of delay path for unmanned aerial vehicle[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2014,15(2):20-23.

**Key words:** path planning; analytical method; delay path; hierarchical planning

在编队无人飞行器的协同飞行中,由于任务时间的改变,个别人飞行器的默认航迹不能满足协同攻击要求,如某一无人飞行器的飞抵时间比其它无人飞行器的飞抵时间早,此时只能让其攻击目标,但这种做法失去了协同攻击的意义,并将影响后续无人飞行器的作战效能。为了精确控制巡航导弹飞抵目标的时间,战斧 Block-IV 巡航导弹引入了“人在回路”制导模式和卫星通信数据链等技术,使其发射后能够更改攻击目标、修正瞄准点,在战场上空徘徊待机飞行数小时以便攻击突现目标(时间敏感目标),并可利用传回地面的碰撞前最后一帧画面进行目标毁伤效果评估<sup>[1-3]</sup>。该型导弹一般采用 Tophat 机动、徘徊机动和油门调节等飞抵时间控制方法<sup>[4-6]</sup>。针对此类飞行器进行延时机动飞行的情况,本文采用随机爬高徘徊待机延时航迹说明延时航迹规划的一般方法。

## 1 延时航迹规划流程分析

延时机动航迹规划主要是根据无人飞行器当前飞行航迹的潜在分叉点、威胁风险区的分布情况、飞行区域的地理信息、需要延迟时间  $T_{\text{delay}}$  等来规划适合当前无人飞行器飞行状态的延时机动航迹。本文基于分层规划思想<sup>[7]</sup>提出了一种延时航迹的规划方法,见图 1。

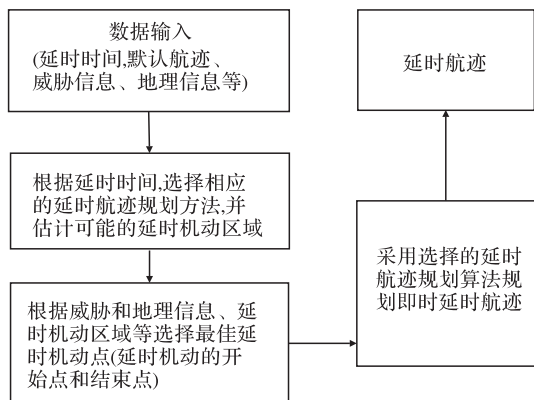


图 1 延时航迹规划流程图

Fig.1 Delay path planning flowsheet

## 2 延时机动点选择

### 2.1 延时机动区域估计

延时机动区域指为无人飞行器选择延时机动飞行所在的安全区域<sup>[8]</sup>,见图 2。

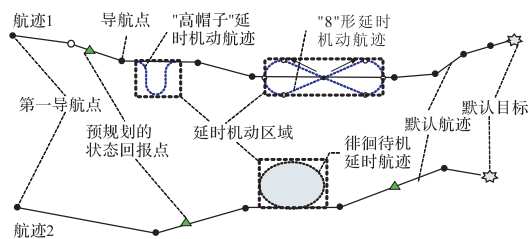


图 2 延时机动区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of delay movement region

为不失一般性,本文只考虑通过随机爬高徘徊待机延时<sup>[8-9]</sup>,并将无人飞行器的延时机动区域描述为长度为  $a_{\text{delay}}$  的正方形。假设  $T_{\text{delay}}$  为需要延时时间,  $V_m$  为无人飞行器当前的飞行速度,  $S_{\text{delay}}$  为无人飞行器在延时时间内的总飞行距离,则延时区域对应的描述参数  $a_{\text{delay}}$  的计算方法为:

$$a_{\text{delay}} = \frac{2S_{\text{delay}}}{\pi + 2\sqrt{2}} \quad (1)$$

式中  $S_{\text{delay}} = T_{\text{delay}} V_m$ 。

### 2.2 延时机动点确定

无人飞行器的延时机动点包括:无人飞行器实施延时机动的瞄准点  $P_{sd}(X_{sd}, Y_{sd}, Z_{sd})$  和结束点  $P_{ed}(X_{ed}, Y_{ed}, Z_{ed})$ ,以及无人飞行器实际转入延时航迹的开始点  $P_{rd}(X_{rd}, Y_{rd}, Z_{rd})$ 。结合无人飞行器的飞行特点和实际作战情况,延时机动一般选择在航迹飞行的中段,且远离敌方威胁进行,其选择的一般过程见图 3。

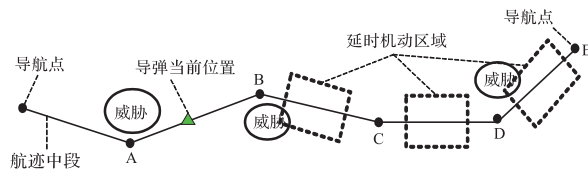


图 3 延时机动点选择示意图

Fig.3 Schematic diagram of delay movement point chosen

从图 3 可以看出,根据无人飞行器当前位置,延时机动点从无人飞行器当前位置的下一个导航点  $B$  开始搜索,通过对航迹段  $BC$ 、 $CD$  和  $DE$  的延时机动点搜索,发现只有航迹段  $CD$  没有在敌威胁范围内,故选择其对应的延时机动区域,相应的点  $C$ 、 $D$  分别为延时机动的瞄准点和结束点。

## 3 随机爬高徘徊延时航迹规划模型

随机爬高徘徊延时航迹指从默认航迹中的某个导航点开始转入随机爬高徘徊航迹飞行一圈或数圈,从而实现飞抵时间的延时<sup>[8-9]</sup>。可以通过求解图

4中矩形  $ABCD$  的坐标值来间接求解徘徊延时航迹,则徘徊延时可以表示为: $O_1 \rightarrow \{O \rightarrow a_1 \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow a_2\} \rightarrow O \rightarrow O_2$ ,括号内的导航点可以根据延时时间要求进行重复飞行,延迟时间的长度可以通过循环的圈数和矩形  $ABCD$  的大小来控制。

假设  $AC=2a, AB=2b$ ,其中  $a, b$  的大小与延时时间和飞行速度相关,本文不作讨论。不失一般性,当  $b=2a$ ,则徘徊形状为圆形。其中  $O_1, O_2$  为初始点, $O$  为  $O_1O_2$  的中点。当  $y_1 \neq y_2$  且  $x_1 \neq x_2$  时,徘徊延时的俯视图见图 4,则当徘徊环在航迹段上方时,各节点的坐标见式(2)。

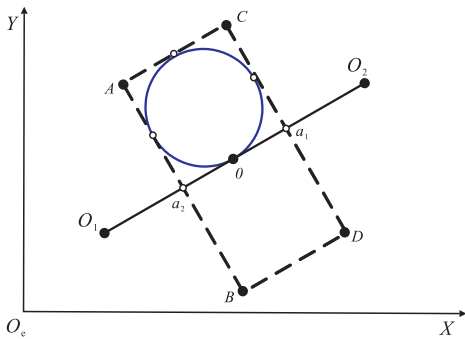


图 4  $y_1 \neq y_2$  且  $x_1 \neq x_2$  时的徘徊延时航迹

Fig.4  $y_1 \neq y_2$  and  $x_1 \neq x_2$  hover delay path

$$\begin{cases} a_1: x_{a_1} = x_o + \frac{a}{\sqrt{1+k^2}}, y_{a_1} = y_o + \frac{ka}{\sqrt{1+k^2}} \\ a_2: x_{a_2} = x_o - \frac{a}{\sqrt{1+k^2}}, y_{a_2} = y_o - \frac{ka}{\sqrt{1+k^2}} \\ A: x_A = x_{a_2} - \frac{b}{\sqrt{1+k'^2}}, y_A = y_{a_2} - \frac{k'b}{\sqrt{1+k'^2}} \\ B: x_B = x_{a_2} + \frac{b}{\sqrt{1+k'^2}}, y_B = y_{a_2} + \frac{k'b}{\sqrt{1+k'^2}} \\ C: x_C = 2x_o - x_B, y_C = 2y_o - y_B \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$ ;  $k' = -\frac{1}{k}$ 。

## 4 仿真计算与分析

采用上述徘徊延时生成方法,根据表 1 给定的默认飞行航迹和表 2 给定的仿真参数初始值,通过 Matlab 语言进行仿真计算,延时航迹规划结果见表 3、图 5。可以看出,徘徊延时的延时机动区域有效地避开了威胁风险区,选择在安全且地形较为平坦的地方进行延时机动飞行,规划的徘徊延时能够满足了要求的飞抵时间调整量,航迹规划总时间在给定的时间范围内,验证了算法的有效性。

表 1 默认飞行航迹数据

Tab.1 The default flight track data

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
X/km	220	190	180	175	145	145	120	120	40	40	60	60	40	40	45
Y/km	295	295	285	285	255	250	225	215	135	110	90	65	45	15	0
Z/km	160	160	160	160	160	160	160	160	200	200	200	200	200	200	200

表 2 仿真参数初始值

Tab.2 the initial value of simulation parameters

参数	参数值
飞行器当前位置/km	(180,285,0.053 402)
飞行速度/(m · s <sup>-1</sup> )	240
延时时间/s	1 400
$\xi_c$	1 000
风险区数量/个	3
	(15,7,0.103,5)
风险区参数/km	(6,16,0.124,5)
	(18,25,0.083 4,6)
$\xi_c$	1 000

表 3 徘徊延时规划结果特征参数值

Tab.3 results of hover delay planning parameters

参数名称	参数值
要求延迟时间/s	1 400
可延迟时间/s	1 399.196 7
参数 $a$ /km	10.6
参数 $b$ /km	21.2
规划时间/s	17.21
飞行圈数/圈	5
节点数/个	22
延时航迹风险值	0

图5 徘徊延时航迹规划结果图

Fig.5 Hover delay path planning result diagram

## 5 结语

根据无人飞行器可以进行徘徊飞行的特点,结合编队无人飞行器在作战中需要进行延时的实际,本文中给出了基于分层规划思想的延时航迹规划方法。规划出需要的延时航迹,规划总时间在规定的范围内,较好地满足了无人飞行器需要延时飞行的时间要求。

对于延时量较短的情况,延时航迹也可以采用控制飞行速度、“高帽子”延时航迹来进行延时;对于延时量较长的情况,还可以采用“8”形延时航迹进行延时,其规划过程与徘徊延时航迹规划过程相似。由于采用定高飞行模式,航迹规划计算量相对较小,因此此类航迹规划可以考虑通过机上自主规划系统实现。

### 参考文献(References):

- [1] 赵莹, 尚绍华. 美国的常规远程巡航导弹——战术战斧[J]. 飞航导弹, 2007(9):1-5.  
ZHAO Ying, SHANG Shaohua. The remote cruise missile: deep fire [J]. Winged missiles journal, 2007 (9):1-5. (in Chinese)
- [2] Zhang D Q, Lei G, Xian Y, et al. Analysis of Path Planning Method based on Monte-Carlo[C]//The 2nd international conference on advanced computer control. Shenyang: [s.n.], 2010:176-180.
- [3] 朱爱平, 叶蕾. 战术战斧导弹武器控制系统[J]. 飞航导弹, 2011(9):61-66.  
ZHU Aiping, YE Lei. The weapon-controls system of deep fire[J]. Winged missiles journal, 2011(9):61-66. (in Chinese)
- [4] Stephanie G. Tactical tomahawk: strike planning, mo-

nitoring and control summary of operator interface prototypes developed at UVA from 2000-2005 [R]. Virginia: University of Virginia, 2005

- [5] Radm J, V. Navy Precision Strike Acquisitions[R]. [S. l.]: Program executive office cruise missile and UAVS, 2000.
- [6] 刘新, 周成平, 俞琪, 等. 基于分层策略的三维航迹快速规划方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(11):2524-2529.  
LIU Xin ZHOU Chengping, YU Qi, et al. 3D fast route planning based on hierachinal strategy[J]. Journal of astronautic, 2010, 31(11), 2524-2529. (in Chinese)
- [7] Mitsutake K, Higashino S I. An A\* -EC hybrid path planning method for waypoint traveling problem considering terrain[R]. AIAA 2008-7133.
- [8] 张欧亚. 面向 Agent 的巡航导弹武器控制系统分析与设计[D]. 西安:西北工业大学, 2007.  
ZHANG Ouya. Agent-oriented cruise missile analysis and design of weap on control system [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2007 (in Chinese)
- [9] Duan Haibin, Zhang Xiangyin, Wu Jiang, et al. Max-min adaptive ant colony optimization approach to Multi-UAVs coordinated trajectory replanning in dynamic and uncertain environments[J]. Journal of bionic engineering, 2009(6): 161-173.

### 本刊相关链接文献:

- [1] 王铀, 赵辉, 臧守飞, 等. 考虑多约束的UCAV对地攻击轨迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(6):6-10.
- [2] 左星星, 张斌, 梅桂芳, 等. 基于瞄准误差的战斗机攻击轨迹跟踪仿真实现[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(6):15-19.
- [3] 丁达理, 宋磊, 贺建良, 等. 基于 Voronoi 图和离散微粒群优化算法的UCAV攻击轨迹决策[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(2):1-5.
- [4] 姚佩阳, 薛艺莉, 王冬旭. 迎头抢攻飞行轨迹数学建模及评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(2):6-10.
- [5] 肖松, 谭贤四, 王红, 等. 一种可行的临近空间高超声速目标航迹起始方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(1):11-15.
- [6] 曹晖, 王瑾, 李寰宇, 等. 基于改进粒子群算法的对地攻击最优航迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(1):20-24.

(编辑:徐敏)